

# **ESTUDIO SOBRE LAS CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS MÁS ADECUADAS PARA INSTALAR UNA FACHADA VENTILADA OPACA**

**PECI LÓPEZ, Fernando <sup>(1)</sup>; RUIZ DE ADANA SANTIAGO, Manuel <sup>(1)</sup>**

**COMINO MONTILLA, Francisco <sup>(1)</sup>**

fernando.peci@uco.es

<sup>(1)</sup>Universidad de Córdoba, Escuela Politécnica Superior, Departamento de Química-Física y Termodinámica Aplicada

## **RESUMEN**

La necesidad de conseguir edificios energéticamente eficientes hace necesario el aprovechamiento de todas las fuentes de energía disponibles. Una de esas fuentes de energía es la energía solar. Existen diferentes formas de captar y utilizar la energía solar en un edificio, una de las cuales es la utilización de captadores solares en sus fachadas. Una fachada ventilada opaca (FVO) cumple esta función absorbiendo parte la radiación solar incidente y transfiriéndola al aire de ventilación, y de esta forma reduciendo la carga sensible del sistema de calefacción en la temporada de invierno. Esta reducción del consumo de energía depende de las condiciones meteorológicas a corto plazo y de las condiciones climatológicas de su localización a largo plazo. Las características de radiación solar, temperatura ambiental y velocidad del viento afectan al funcionamiento de una fachada ventilada opaca de diferente forma. El conocimiento de la influencia de estas variables en el rendimiento de una FVO es necesario para decidir si una determinada localización es adecuada para la instalación de este tipo de sistemas. Para este objetivo, en este estudio se realizó un estudio de sensibilidad del ahorro de energía respecto a las variables meteorológicas más importantes mediante simulaciones con un modelo numérico. Además se evaluó el ahorro energético en 12 ciudades correspondientes a las 12 zonas climáticas recogidas en el RITE. Los resultados mostraron que la variable más influyente es la radiación solar, aunque una combinación de altas temperaturas y niveles bajos de velocidad del viento pueden también ser favorables. Se concluyó que las localizaciones más convenientes son aquellas con baja severidad climática de invierno.

**Palabras clave:** Fachada ventilada, Energía solar, Ventilación.

## 1. Introducción

La energía solar disponible para un edificio se ha aprovechado tradicionalmente mediante el uso de colectores solares o paneles fotovoltaicos. También se suele aprovechar permitiendo que la radiación solar penetre en los espacios interiores a través de ventanas o cerramientos transparentes. Sin embargo este tipo de cerramientos tienen un alto riesgo de provocar sobrecalentamiento durante la temporada de verano, principalmente en climas cálidos y secos.

Las fachadas ventiladas opacas (FVO) son una alternativa simple y económica para aprovechar la radiación solar disponible para un edificio. En este tipo de fachadas las dos capas son opacas. La radiación solar se absorbe en la capa exterior y parte de la energía absorbida se transfiere al aire que circula entre las dos capas. La capa interior es una capa de aislamiento, por lo que se elimina el riesgo de sobrecalentamiento en la temporada de verano.

Debido a que la energía solar disponible depende fuertemente de la localización del edificio y de las condiciones climáticas, resulta adecuado conocer qué variables meteorológicas influyen más en el comportamiento de las FVO para poder establecer las localizaciones más favorables para instalarlas.

El objetivo de este artículo es encontrar las características meteorológicas que deben poseer las mejores localizaciones para instalar una FVO y determinar qué variables meteorológicas influyen más en las sus prestaciones. Para conseguir este objetivo se realizó un estudio de sensibilidad del comportamiento energético de una FVO respecto a las principales variables meteorológicas y se realizaron simulaciones comparativas de edificios con y sin FVO en diferentes zonas climáticas en España.

## 2. Metodología

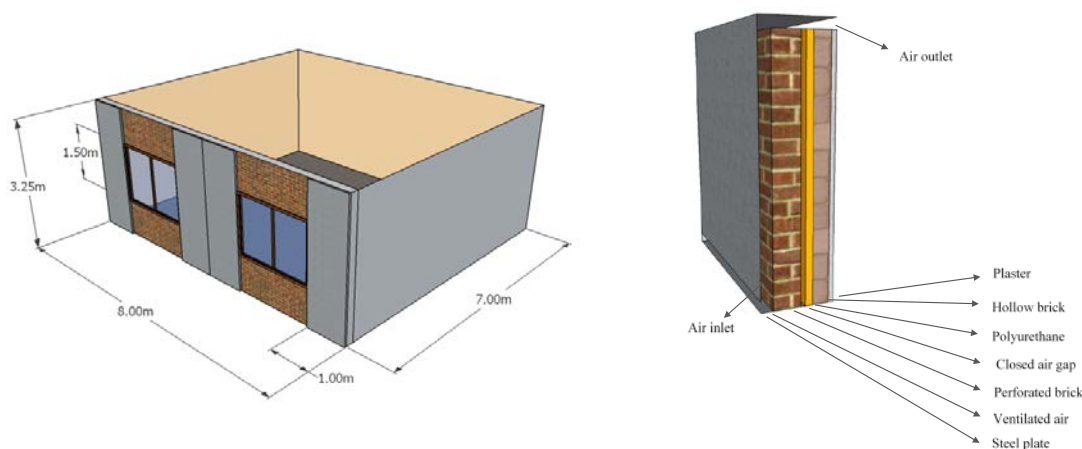
### 2.1. Modelo numérico

Para el presente estudio se utilizó el modelo de fachada ventilada validado experimentalmente y cuya descripción puede encontrarse en [1-24,2[Peci López, 2015 #1075]]. Este modelo se incluyó en el modelo de edificio implementado en el software de simulación de edificios TRNSYS [3-25].

### 2.2. Caso a estudio

El edificio seleccionado es un edificio de cuatro plantas de forma prismática rectangular. Dentro de este edificio se estudió una sala de oficinas de 8 x 7 x 3,25 m, figura 1. La fachada de dicha sala está equipada con cuatro módulos de FVO de un metro de ancho, cubriendo entre todos la mitad de la fachada sur. La otra mitad de la fachada sur y la fachada norte está compuestas de cerramientos convencionales. Las ventanas de la fachada sur cubren la cuarta parte del área total de la fachada. El resto de muros, el suelo y el techo separan la sala en estudio de otros locales similares. Los materiales que componen los muros y sus propiedades aparecen en [2]. El horario de trabajo establecido es de 9:00 am a 5:00 pm de lunes a viernes. La ocupación es de 6 personas con un grado de actividad 4 según [4-26] (sentados, trabajo ligero). Cada persona tiene asignada un ordenador con 80 W de consumo. La iluminación es a base de lámparas fluorescentes con una potencia de 10 W/m<sup>2</sup>. La iluminación permanece encendida durante el tiempo de trabajo. La consigna de temperatura del aire es de 21°C y la humedad relativa del 50 %. La energía trasferida al aire del local para mantener estas condiciones se calcula en las simulaciones.

El caudal de aire de ventilación se establece a partir de la normativa [5-27], correspondiente a una muy buena calidad de aire (IDA 2). Según este criterio es necesario proporcionar  $12,5 \text{ m}^3$  de aire por persona. Se considera una densidad de ocupación de  $9 \text{ m}^2/\text{persona}$ , lo que da una ocupación de 6



**Figura 1. Esquema del local y composición de la FVO**

personas y un caudal de ventilación de  $270 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Los coeficientes de transferencia de calor por convección para las superficies externas se calcularon de acuerdo a [6-29] con las expresiones (2) y (3).

$$H_{ext}=4.8 + 1.7 V_f \text{ (barlovento)} \quad (2)$$

$$H_{ext}=2.6+2.5 V_f \text{ (sotavento)} \quad (3)$$

Donde  $V_f$  es la velocidad del viento a la altura de la azotea.

### 2.3. Estrategia de control

La compuerta interior de la FVO se mantiene siempre abierta durante el horario de trabajo, permitiendo la ventilación mecánica del local a través de la cámara interior de la FVO. Fuera de las horas de ocupación la fachada se abre cuando la temperatura del aire en la fachada es mayor de  $23^\circ\text{C}$  y se cierra cuando baja de los  $21^\circ\text{C}$ . La eficiencia de la FVO se evalúa con la expresión [7-20]:

$$\eta_{coll} = \frac{\dot{m}c_p(T_{out}-T_{amb})}{I_s A} \quad (4)$$

Donde  $\dot{m}$  es el caudal de aire ( $\text{kg/s}$ ),  $c_p$  es el calor específico del aire ( $\text{J/Kg } ^\circ\text{C}$ ),  $T_{out}$  es la temperatura del aire a la salida,  $T_{amb}$  es la temperatura ambiente,  $I_s$  es la radiación solar sobre la superficie externa y  $A$  es el área de la superficie externa.

El mismo edificio eliminando los módulos de FVO se simuló en las mismas condiciones para realizar un estudio comparativo. En este edificio la ventilación se toma directamente del exterior. Se utiliza la misma estrategia de ventilación con las aberturas de las mismas dimensiones que en el primer caso. De esta forma el comportamiento de ambos edificios es comparable desde el punto de vista de la ventilación.

### 2.4. Simulaciones

Se realizó un análisis de varianza [8-30] para determinar la influencia de la temperatura, radiación solar y velocidad del viento sobre el ahorro en calefacción. Para ello se construyó una matriz de 125 casos utilizando combinaciones de 5 niveles de las 3 variables. Los niveles se seleccionaron de forma

equidistante entre un mínimo y un máximo correspondiente a niveles diarios encontrados en los datos meteorológicos.

En el segundo grupo de simulaciones se eligieron 12 localizaciones para analizar la influencia de las condiciones climáticas en el ahorro energético durante la temporada de invierno. Las localizaciones se eligieron según [9].

Los archivos climáticos correspondientes a un año meteorológico típico fueron obtenidos del software Meteonorm 5.1 [10-32]. El período de simulación fue desde el 21 de diciembre hasta el 21 de marzo. El paso de simulación fue de 1 h.

### 3. Resultados

En la figura 2 se muestra la demanda diaria de calefacción durante los días laborables para la zona climática B4 con y sin FVO durante el invierno. Se puede observar que esta demanda es menor para el caso con FVO durante todos los días. Sin embargo la diferencia entre los valores con y sin FVO toma valores variables. En seis de los días la demanda fue cero mientras la demanda en el caso sin FVO fue positiva. También hubo días en los que la demanda fue similar en ambos casos. La demanda media con FVO fue de 3,53 kWh mientras que en el caso sin FVO fue 6,17 kWh. Por tanto, instalar un sistema de FVO supuso un ahorro del 43% relativo al caso sin FVO.

La variabilidad en el ahorro energético fue debida a las diferentes condiciones meteorológicas de cada día. Las variables meteorológicas más influyentes sobre el comportamiento de la fachada de acuerdo con el modelo numérico fueron radiación solar incidente, temperatura ambiente y velocidad y dirección del viento. La influencia de cada variable no se puede determinar de una forma simple. Por tanto se realizó un análisis de sensibilidad con las variables más importantes. De esta forma los climas más favorables para instalar un sistema de FVO pueden ser determinados.

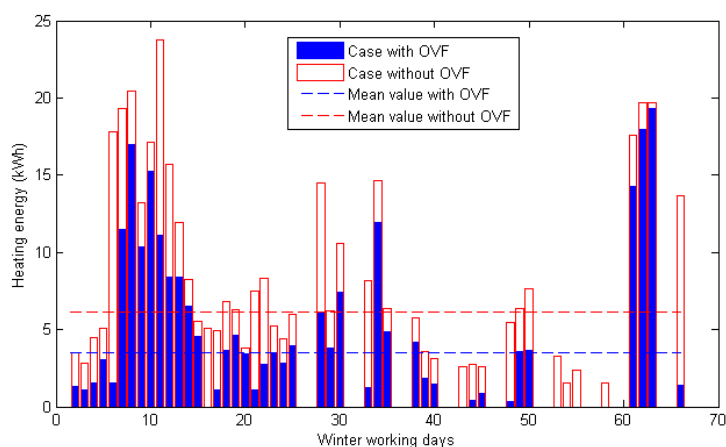
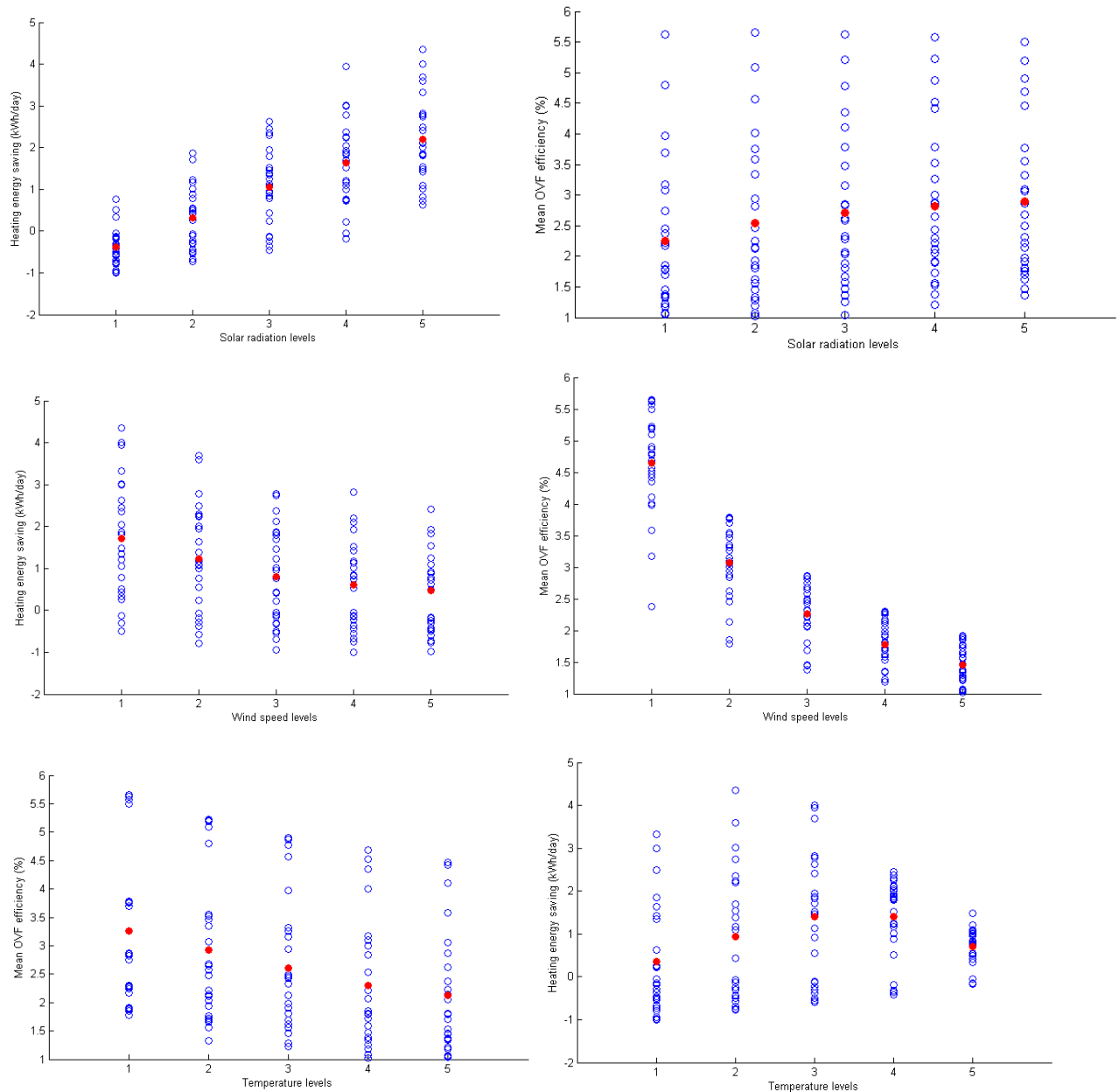


Figura2. Comparativa de demanda de calor entre edificios con y sin FVO durante días laborables en la temporada de invierno en localización B4.

La figura 3 representa los efectos simples de la temperatura, la radiación y la velocidad del viento sobre el ahorro energético diario en los 125 casos y los efectos simples de las mismas variables sobre la eficiencia de la FVO. En el caso de la radiación la tendencia general del ahorro energético es a aumentar cuando aumenta la radiación. Este resultado era esperado ya que la radiación solar directa es la principal fuente de energía térmica de la FVO. El ANOVA confirma esta conclusión. En ANOVA la suma de cuadrados del parámetro radiación fue claramente mayor que la del resto de parámetros[2]. La radiación solar resultó el parámetro menos influyente sobre la eficiencia de la FVO. Otros estudios coinciden en esto [7,11].

Otro resultado esperable fue que el ahorro energético disminuyera con la velocidad del viento. Cuanto mayor es la velocidad del viento, mayores los coeficientes de transferencia de calor por convección en las ecuaciones 2 y 3 y por tanto mayores la transferencia de calor hacia el aire exterior. Esto hace que

disminuya la eficiencia de la FVO. Por otro lado, se encontró un valor máximo de ahorro de energía en el estudio del parámetro temperatura. Para explicar esto es necesario tener en cuenta el efecto combinado de temperatura y radiación solar. Se puede observar que esta combinación es la más influyente. En la figura 4 se puede ver que con altos niveles de radiación solar la energía ahorrada disminuye fuertemente con la temperatura, mientras que con niveles de radiación bajos la pendiente se suaviza. También se observa que el máximo observado depende de la velocidad del viento. A medida que la velocidad del viento aumenta, la temperatura de máximo ahorro energético se desplaza a valores más altos. Dado que las temperaturas máximas no suelen ser altas en invierno, cuando el viento es alto, este valor óptimo no se alcanza y los parámetros que afectan son entonces solamente la radiación solar y la temperatura. La tendencia opuesta fue hallada para la eficiencia de la FVO, aunque con una influencia más débil. Un resultado



similar puede encontrarse en [12].

**Figura 3. Efectos simples de la radiación, temperatura y velocidad del viento sobre el ahorro energético y la eficiencia**

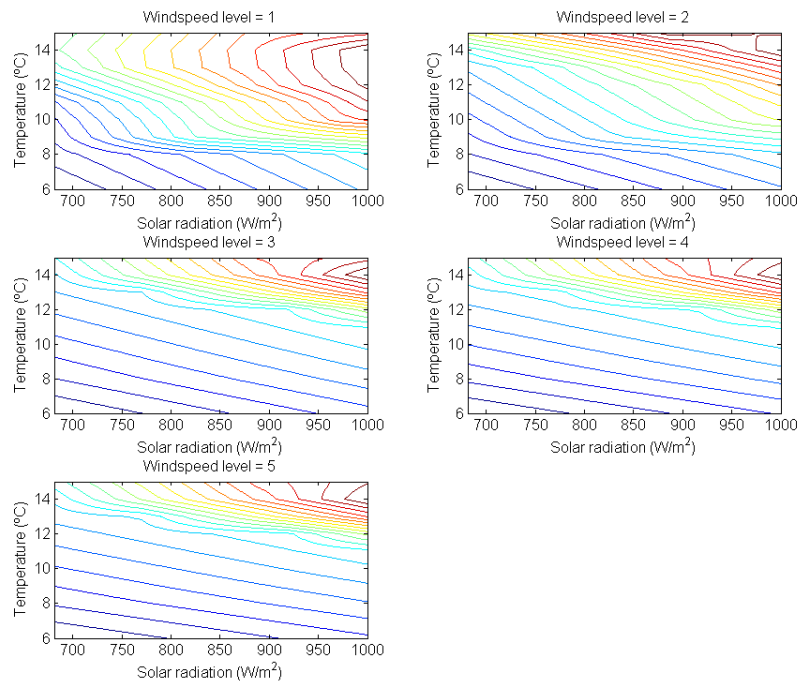


Figura 4. Ahorro energético frente a la temperatura ambiente y la radiación solar para cada nivel de velocidad del viento.

Por tanto, el rendimiento de una OVF será mejor en climas secos donde predominen los días soleados y la velocidad del viento sea baja en promedio. Las ventajas de utilizar una FVO serán mayores en climas con temperaturas invernales moderadas.

En la figura 5 se muestra el ahorro energético evaluado para 12 localizaciones correspondientes con las 12 zonas climáticas establecidas en [2]. Las localizaciones están ordenadas por severidad climática de invierno creciente y severidad climática de verano decreciente. Para poder estudiar la correspondencia de estos resultados con los resultados del análisis de sensibilidad se representan las funciones de distribución de las variables radiación en la fachada, temperatura ambiente y velocidad del viento para cada localización en las figura 6.

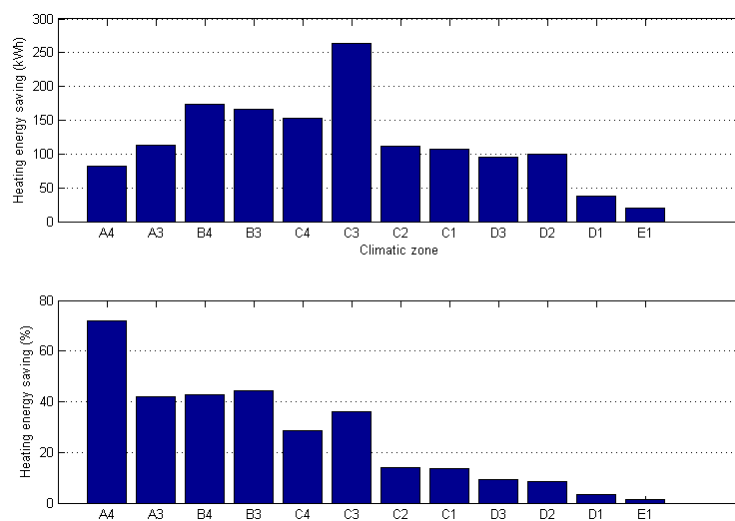
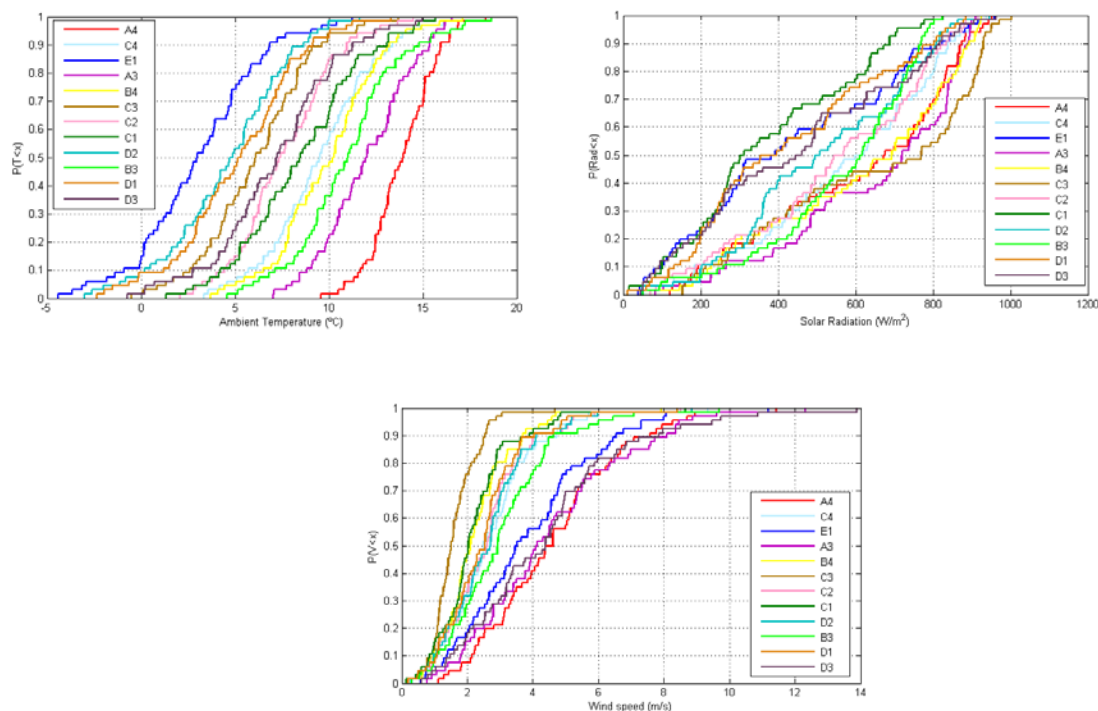


Figura 5. Ahorro de energía durante la temporada de invierno usando una FVO relativo al mismo edificio sin FVO para cada localización. Valores absolutos y porcentajes.



**Figura 6. Funciones de distribución de la radiación, temperatura y velocidad del viento en las diferentes zonas climáticas**

Respecto a la radiación, se puede observar que el mayor ahorro energético en términos absolutos se produjo en las localizaciones con severidad climática de invierno media. La mayoría de las localizaciones con un ahorro energético elevado corresponden con localizaciones con alto nivel de radiación solar. Destaca el caso de la localización C1, ya que a pesar de tener la función distribución de radiación más baja, sus niveles de temperatura son elevados y sus niveles de viento bajos. Esto hace que resulte un nivel de ahorro energético comparable con localizaciones con más niveles más alto de radiación. También es preciso remarcar el caso de la localización A4, con el segundo más alto nivel de radiación y la más alta función de distribución de temperatura. En este caso sus niveles de ahorro resultaron bajos debido a los altos niveles de velocidad del viento.

Respecto a la temperatura, en general las localizaciones con altas temperaturas correspondieron con aquellas con mayores ahorros de energía. Las excepciones fueron los casos de las zonas A4, descrito anteriormente, y C3. En este último caso las condiciones son de baja temperatura, alta radiación y bajo nivel de velocidad del viento. De nuevo, las zonas con niveles de baja velocidad del viento corresponden con los mayores ahorros energéticos, con la excepción de la localización A3 y las localizaciones D1 y D2, con bajos niveles de radiación y temperatura.

Los mismos resultados están representados en la figura 5 en forma de porcentajes de ahorro energético relativo al caso sin FVO. Puede observarse que al contrario de los valores absolutos, los porcentajes con casi inversamente proporcionales a la severidad climática de invierno. La razón es que aunque el ahorro energético es bajo en zonas de baja severidad climática de invierno, la energía necesaria es también baja, y por tanto la mayor parte de la demanda de calor puede ser satisfecha mediante la FVO.

Lo contrario se cumple también para los climas más fríos. La excepción a esta regla aproximada fue la localización C3. En este caso el ahorro energético resultó ser alto debido principalmente al alto nivel de radiación solar. El porcentaje de ahorro resultó alto a pesar de ser una localización con bajas temperaturas.

Estos resultados son coherentes con el estudio de sensibilidad. Por tanto, es posible estimar los beneficios de usar un sistema con FVO en una cierta localización recopilando información sobre las variables meteorológicas en dicha localización durante la temporada de invierno.

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se han estudiado los efectos simples y combinados de las variables meteorológicas sobre el funcionamiento de un sistema de FVO durante la temporada de invierno. Con los resultados obtenidos, se realizó un estudio destinado a determinar las mejores localizaciones para instalar este sistema en España. Las principales conclusiones de este estudio son las siguientes:

- La variable meteorológica más influyente sobre la demanda de calor es la radiación solar sobre la fachada. La temperatura y la velocidad del viento también son influyentes. El ahorro energético aumenta cuando la radiación solar y la temperatura aumentan, mientras que el ahorro energético tiene un valor máximo con radiación y velocidad del viento constantes, para cada temperatura. El efecto combinado más influyente es el de radiación solar y temperatura ambiente.
- Se encontró que el ahorro energético en el invierno es positivo para todas las localizaciones simuladas.
- Las mejores localizaciones para instalar una FVO en España son las de las regiones del sur y zonas costeras, zonas climáticas A3, B3, B4, C3 and C4. Corresponden con aquellas con los mayores niveles de radiación solar. Las localizaciones con menor radiación solar y alto ahorro energético, son regiones con altos niveles de temperatura y bajos niveles de velocidad del viento.
- En general, las mejores localizaciones para instalar una FVO son aquellas con severidad climática media en términos absolutos y severidad climática baja en términos relativos.

Como continuación a esta investigación es necesario el estudio del comportamiento de una FVO en la temporada de verano. Dado que la fachada es opaca no existe riesgo de sobrecalentamiento. Sin embargo habría que estudiar si la inclusión de una capa metálica adicional favorece o empeora el comportamiento de la fachada, y qué modos de funcionamiento en ventilación son los más adecuados.

#### 5. Referencias

- [1] López, F.P., et al., Experimental analysis and model validation of an opaque ventilated façade. *Building and Environment*, 2012. 56(0): p. 265-275.
- [2] Peci, F., et al., Sensitivity study of an opaque ventilated façade in the winter season in different climate zones in Spain. *Renewable Energy*, 2015. 75(0): p. 524-533.
- [3] UoW-M, S.E.L., *TRNSYS 16 Reference Manual*. 2004, GmbH TE, CSTB, TESS.
- [4] AENOR, *ISO-EN-7730-2005 Ergonomics of the thermal environment –Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort effects*. 2006.
- [5] AENOR, *RITE (Regulation of Thermal Installations in Buildings) IT 1.1.4.2.2*. 2011.
- [6] Palyvos, J.A., *A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems' modeling*. *Applied Thermal Engineering*, 2008. 28(8–9): p. 801-808.
- [7] Chan, H.-Y., et al., *Thermal Analysis of Flat and Transpired Solar Façades*. *Energy Procedia*, 2014. 48(0): p. 1345-1354.
- [8] Montgomery, D.C., *Desing and Analysis of Experiments*. 5ª ed. 2001: John Wiley & Sons, INC.
- [9] CTE (*Código Técnico de la Edificación*). 2006, Ministerio de la Vivienda. Gobierno de España.
- [10] Remund J., K.S., Schilter C., Muller S., *METEONORM Version 6.0 Handbook*. 2010.



- [11] Badache, M., et al., *Experimental and Two-dimensional Numerical Simulation of an Unglazed Transpired Solar Air Collector*. Energy Procedia, 2012. **30**(0): p. 19-28.
- [12] Leon, M.A. and S. Kumar, *Mathematical modeling and thermal performance analysis of unglazed transpired solar collectors*. Solar Energy, 2007. **81**(1): p. 62-75.